Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 621.396.96

DOI: 10.30748/zhups.2021.68.18

В.А. Ляшенко, В.М. Зозуля, О.В. Рижков, О.В. Юла, В.В. Стригун, Р.Д. Барвінок

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНОЇ СИСТЕМИ MFTR – 2100/40 НА ОСНОВІ ПРОВЕДЕНОГО АНАЛІЗУ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

У статті досліджено процес застосування доплерівської радарної системи зовнішньо – траєкторних вимірювань типу MFTR–2100/40, в якій технічно реалізована одночасна сумісна робота радіолокаційного та оптико – електронних каналів, які окрім траєкторних параметрів дозволяють отримати відеозапис (кінограму, фотографічний портрет) об'єкту супроводження, що дає можливість проведення аналізу його просторової орієнтації у русі, траєкторії, динаміки руху, розділення, підриву, руйнування, пуску. та запропоновані рекомендації щодо її застосування на основі проведеного аналізу випробувань зразків озброєння та військової техніки на полігонах Збройних Сил України.

Ключові слова: радарна система, траєкторні параметри, об'єкти випробувань, зовнішньо-траєкторні вимірювання

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз існуючих радарних систем траєкторних вимірювань виявляє їх важливу роль при проведенні випробувань нових та модернізованих зразків озброєння та військової техніки (ОВТ), що пропонуються для прийняття на озброєння Збройних Сил України (ЗС України). Результати траєкторних вимірювань (ТВ) являються вихідними даними для оцінки якості функціонування об'єктів випробувань.

Мережа полігонів, яка на даний час існує на території України, не надає різноманітності у використанні та застосовується за вузьким, цільовим призначенням. Полігони ЗС України не обладнані засобами вимірювань, тому вони мають обмежені можливості щодо забезпечення у повному обсязі випробувань зразків ОВТ, а також щодо здійснення безперервного контролю за діями військ (сил) та застосуванням озброєння і засобів ураження.

Отже, можна стверджувати, що існує нагальна потреба у створенні сучасного полігонно-випробувального комплексу (ПВК), здатного забезпечити в повному обсязі програми випробувань зразків ОВТ в умовах, що відповідають сучасним поглядам на ведення бойових дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно із “Загальними вимогами до Полігонно-випробувального комплексу Збройних Сил України”, які затверджені Міністром оборони України

04.11.2015 р. № 19671/з, однією із складових, яка підлягає першочерговому відновленню, є мобільний полігонний вимірювально-обчислювальний комплекс, до якого входить система траєкторних вимірювань у складі радіолокаційних (радарних) систем та оптико-електронних засобів траєкторних вимірювань [1–4].

У зв'язку з цим, у 2018 році на постачання Державного науково – дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки було поставлено доплерівську радарну систему (ДРС) зовнішньо – траєкторних вимірювань (ЗТВ) типу MFTR–2100/40.

Метою статті є розробка рекомендацій щодо застосування радарної системи MFTR–2100/40 при проведенні випробувань озброєння та військової техніки на полігонах ЗС України.

Виклад основного матеріалу

Слід відмітити те, що у ДРС ЗТВ типу MFTR–2100/40 технічно реалізована одночасна сумісна робота радіолокаційного та оптико – електронних каналів, які окрім траєкторних параметрів дозволяють отримати відеозапис (кінограму, фотографічний портрет) об'єкту супроводження, що дає можливість проведення аналізу його просторової орієнтації у русі, траєкторії, динаміки руху, розділення, підриву, руйнування, пуску та інше. Доплерівський ефект виявляється, коли між РЛС і об'єктом має місце відносна швидкість зміни дальності, або радіальна

швидкість. Коли зонduючий сигнал відбивається від такого об'єкту, несуча частота відбитого сигналу буде змінюватися. За умови, що РЛС є моностатичною (передавач і приймач розташовані в одному місці), повна відстань в два рази більше відстані між передавачем і об'єктом. Зрушення доплерівської частоти f_d залежить від довжини хвилі λ зонduючих коливань, а відносна радіальна швидкість (швидкість зміни дальності) між РЛС і об'єктом $V_{відн}$ записується як:

$$f_d = -\frac{2V_{відн}}{\lambda} \quad (1)$$

де $\lambda = \frac{c}{f}$ – довжина хвилі;

c – швидкість світла;

f – несуча частота РЛС.

Коли об'єкт рухається від РЛС, відносна радіальна швидкість, або швидкість зміни дальності, визначається як позитивна величина, і вона приводить до негативного доплерівського зрушення. Існують різні види доплерівських РЛС. В залежності від їх конструкції та ТТХ для проведення вимірювань траєкторних параметрів об'єктів випробувань можливе застосування їх поодиночі, двох та більше доплерівських РЛС або разом з ОЕС ЗТВ. Від цього залежить обиравання позиційного методу проведення вимірювань.

Доплерівські РЛС, в яких використовуються імпульсні сигнали зондування, є складнішими, ніж РЛС з безперервним випромінюванням, але вони забезпечують значні переваги. Найважливішим з них є тимчасове стробування приймача (запирання), воно дозволяє запобігти витoku прямого сигналу передавача в приймач. Це робить можливим використання однієї антени для передачі і прийому, що інакше було б нереальним для РЛС з безперервним випромінюванням через надмірно строгі вимоги до розв'язки режимів передачі і прийому. В імпульсних РЛС може також використовуватися стробування по дальності – специфічний вид стробування, в якому міжімпульсний період розділяється на строби дальності. Тривалість кожного зворотно пропорційна величині ширини смуги зонduючого імпульсу. Стробування по дальності допомагає приймачу виключити зайві перешкоди, щоб вони не конкурували з сигналами, відбитими від об'єкту, і дозволяє визначити дальність за допомогою вимірювання затримки імпульсу (тобто вимірюванням часу між випромінюванням імпульсу і прийомом сигналу, відбитого від об'єкту) [5].

MFTR–2100/40 була задіяна під час проведення випробувань стрілецької зброї, 120–мм міномету, 152–мм снарядів, некерованих авіаційних ракет РС–80, ЗКР та виробів до комплексів С–125–2Д1, С–300В1, С–300ПС, “Тор”, “Бук”, “Куб”, “Тайфун–1”, “Вільха”, “Нептун”, зенітної самохідної установки ЗСУ–23–4М–

А, танку Т–72АМТ, бойових модулів до БМП–1, легкого переносного комплексу “Корсар”, протиракетного комплексу “Бар'єр–В”, та БпЛА різної класифікації та типів, вимірювача дульної швидкості SL–520РЕ.

MFTR–2100/40 є мультисистемною радіолокаційною системою ЗТВ із можливістю відеореєстрації об'єкту та його автоматичного супроводу, яка розроблена на основі багаточастотного доплерівського радара MFDR–2100 Х–діапазону, безперервного випромінювання. Вона призначена для вимірювання параметрів траєкторії одного або декількох об'єктів (у разі попадання декількох об'єктів у радіолокаційний промінь системи або у кадр оптико-електронних засобів).

MFTR–2100/40 ґрунтується на системі азимутально-вертикального супроводу об'єкту. Передавальна і приймальна антени створені із мікросмугових модулів. Всі компоненти у радарній системі вироблені твердотільними [6]. Телевізійна та інфрачервона камери закріплені на приймальній антені паралельно напрямку головного випромінювання передавальної антени (рис.1).

Рис. 1. MFTR–2100/40 (Weibel)
Джерело: розроблено авторами
за даними [6–9].

Принцип дії радарної системи MFTR–2100/40 полягає в наступному: антенна система MFDR–2100/40 складається з однієї передавальної і однієї приймальної панелей антен. Всі мікрохвильові компоненти, включаючи мікроконтролери і DC – DC перетворювачі напруги (DC – Direct Current / постійний струм) розташовані в панелях антен. Передавач передає дві частоти F_1 і F_2 одночасно. Приймач приймає відбиті сигнали (F_1 і F_2) і формує 4 IQ канали, що відповідають F_1 та 4 IQ канали, що відповідають F_2 . Передавальна і приймальна антени складаються з 32 мікросмутових антен. Блок живлення мікрохвильового передавача блоку підсилення високої потужності (High Power Amplifier, далі – HPA) використовується як вбудоване джерело живлення процесора для забезпечення оптимальної продуктивності, управління, діагностики і зручності обслуговування. Конструкція блоку живлення виключає необхідність повторного калібрування передавача, крім того включає в себе живлення детекторів потужності із зворотним зв'язком для роботи з постійною вихідною потужністю для проведення вимірювань. Фільтруючий малошумний підсилювач (Low Noise Amplifier, далі – LNA) підключено до кожної мікросмутової антени приймача і дає показник шуму менш 3 дБ. Фільтрація імпульсів високої потужності запобігає викривленню доплерівського сигналу на виході LNA. Передавач і приймач включають мікроконтролери для управління і діагностики HPA, LNA, базової смуги підсилювачів і генератора. Мікроконтролер фіксує усі показники напруги, струму і температури. Передавач і приймач захищені обтічником з скловолокна від несприятливих погодних умов, який забезпечує мінімальне зниження сигналу через дію на поверхню радара дощу і снігу. Всі функції антенної системи виконуються автоматично за допомогою процесора реального часу (Real Time Processor, далі – RTP) або вручну оператором MFTR–2100/40 з консолі оператора, зокрема управління кутом розкриття.

Реалізована можливість супроводження об'єкту по телевізійним каналам за допомогою системи супроводження VT-2100 із застосуванням оптико-електронних засобів (відеокамера, інфрачервона камера). Під час відсутності радіолокаційних даних про дальність до об'єкту супроводження (вимірювань) по телевізійним каналам можливо отримати дані лише про азимут та кут місця до визначеного об'єкту (при роботі однієї ДРС ЗТВ). Для отримання даних про дальність до об'єкту по телевізійним каналам необхідно сумісне використання двох систем, в яких реалізовано алгоритм розрахунку триангуляційним способом.

При отриманні даних радарної системи MFTR–2100/40 використовується метод швидкого перетворення Фур'є (Fast Fourier Transform, далі – FFT) для визначення часу, швидкості, азимута і кута місця одного або декількох об'єктів із 8 IQ доплерівських си-

гналів. Це робиться у реальному часі або під час післясеансної обробки.

Оцифровані доплерівські сигнали і результати обробки зберігаються в RTP або у комп'ютері збереження даних у реальному часі (Real Time Data Storage computer, далі – RTDS), що дозволяє системі не втрачати інформацію для обробки в автономному режимі. Результати післясеансної обробки можуть бути представлені в декількох системах координат і включають серед іншого графічне представлення обробки даних контролером:

- швидкостей в залежності від часу і відстані (радіальної, тангенціальної);
- прискорень в залежності від часу та відстані (радіальних, тангенціальних);
- відстані в залежності від часу;
- куту огляду в залежності від часу;
- траєкторії руху об'єкту вимірювань;
- коефіцієнту опору в залежності від часу і числа Маха;
- доплерівського сигналу в залежності від часу для кожного каналу.

Файли даних заносяться до інструментального контролеру. Реалізована можливість отримання даних із масиву пам'яті. Зберігаються наступні дані:

- результати вимірювань, збережені в режимі реального часу;
- оцифровані доплерівські сигнали, включно з параметрами зібраних даних про кут місця та азимут антенної системи;
- результати постоброблення для подальшого аналізу;
- результати положення, кута і швидкості;
- балістичні результати;
- необроблені дані про час, швидкість та положення із on-line або off-line аналізу;
- параметри настройки для процесора реального часу RTP–2100 та п'єдесталу антени AP–2100;
- числові вихідні дані у файли ASCII;
- графічні файли у форматах JPEG (JPG), BMP, PNG, EMF, KMZ;
- відеофайли з телевізійної та інфрачервоної камер у форматі ASF.

На зображення з оптико-електронних засобів накладаються наступні цифрові індикатори:

- азимута;
- кута місця;
- дальності;
- режиму супроводження;
- відео;
- радіолокаційного;
- по даним від зовнішніх джерел;
- дати і часу (синхронізовані по IRIG – B);
- куту розкриття променю антени (синя прямокутна рамка);
- об'єкту, виявленого радарною системою (зелене

коло);

– об'єкту, зафіксованого камерою (біла прямокутна рамка);

– центру оптичної осі (білий хрест).

Режими супроводження радарної системи MFTR–2100/40 дають можливість працювати в 7-ми різних режимах незалежно один від одного [6–12].

У всіх режимах фактична траєкторія може бути обчислена і відображена для всіх об'єктів, що рухаються в промені радару.

Режим 1. Активне супроводження рухомого об'єкту в реальному часі.

В цьому режимі MFTR–2100/40 відстежує рухомий об'єкт, аналізує весь спектр даних, проводячи цифрову обробку сигналу. Якщо в активному режимі реального часу сигнал від об'єкту втрачено, ПЗ WinTrack автоматично апроксимує траєкторію на основі попередніх даних вимірювань. Радар переміщується по прогнозованій траєкторії до моменту отримання сигналу від об'єкту та продовжує його супроводження.

Режим 2. По підготовленій сигнальній операції.

Радар переміщується по попередньо заданим даним, та починає вимірювання, якщо об'єкт переміщується по заданій (прогнозованій) траєкторії. Траєкторія може бути оновлена в реальному часі на основі фактичного вимірювання в автоматичному або ручному режимах. Це можливо здійснити рішенням оператора у будь-який час за командою переведення MFTR–2100/40 в активне супроводження і назад до попереднього режиму вимірювань.

Режим 3. Робота з нерухомою антенною системою (фіксоване супроводження).

Радар не рухається, але здійснюються вимірювання в межах діаграми спрямованості променю при наявності об'єкту. У будь-який час за рішенням оператора можливо перевести MFTR–2100/40 до активного режиму супроводження.

Режим 4. Робота в ручному (керованому) режимі.

Оператор має можливість в ручному режимі переміщувати радар для супроводження об'єкту вимірювань. Існує можливість у будь-який час перевести MFTR–2100/40 до автоматичного режиму супроводження.

Режим 5. Режим роботи Cued (Master/Slave).

Передбачена можливість одночасної сумісної роботи декількох радарних систем (попередньо фірми Weibel) для супроводження об'єкту вимірювань.

Ведені радарні системи (Slave) отримують азимут і кут місця від ведучої радарної системи (Master) і автоматично налаштовуються для супроводження або подальшого супроводження об'єкту. Існує можливість у будь-який час перевести радарні системи в інший режим супроводження (активний, фіксований, ручний).

В процесі постоброблення вимірних радіолокаційних даних, оброблюється інформація з усіх радар-

них систем, що працювали в режимі роботи Cued (Master/Slave).

Режим 6. Робота в режимі відеосупроводження.

MFTR–2100/40 визначає кут місця і азимут об'єкту на основі інформації про відстеження з системи супроводження VT–2100, цей режим особливо корисний при супроводженні польоту по довільній траєкторії ЛА (БпЛА).

Режим 7. Режим сканування.

Радар автоматично сканує визначений сектор простору, шукаючи об'єкт і при його виявленні переключається в режим активного супроводження. Існує можливість у будь-який час за рішенням оператора перевести MFTR–2100/40 в інші режими супроводження. Цей режим особливо корисний при відстеженні польоту по довільній траєкторії ЛА (БпЛА) або у разі пошуку втраченого об'єкту.

На практиці застосування MFTR–2100/40 визначено, що в залежності від мети та умов вимірювань і розміщення позицій пускових установок на підготовку MFTR–2100/40 до вимірювань необхідно 1-2 дні з моменту прибуття на полігон за умови надання операторам попередньої інформації, яка необхідна для внесення у ПЗ WinTrack.

З досвіду проведення випробувань та вимірювань за допомогою MFTR–2100/40, з урахуванням особливостей налаштування ПЗ WinTrack, обираючи режим супроводження, апроксимації і способу визначення дальності радарною системою, фахівцями відпрацьований перелік первинних даних, що необхідні операторам для ефективного проведення вимірювань [6–10].

Планування місії:

– визначення оптимального розміщення MFTR–2100/40 відповідно до позицій пускової установки (вогневих позицій, точок старту) по даним симулятора ПЗ WinTrack;

– визначення (отримання) відповідних координат;

– перевірка достатності співвідношення “сигнал/шум” для проведення вимірювань та відстроювання від шумів;

– прогнозування впливу місцевих метеорологічних умов;

– настройка візуалізації даних на дисплеї контролю у реальному часі;

– складання структури вікна відображення поточної інформації, типи і опції графіків;

– експорт необхідної карти місцевості у ПЗ WinTrack;

– визначення частот дискретизації для запису доплерівської інформації;

– визначення частот для виміру дальності;

– прогнозування траєкторії вимірювань;

– перевірка можливості супроводження об'єкту на всіх ділянках прогнозованої траєкторії.

Для підготовки MFTR–2100/40 до вимірювань, перед проведенням першого вимірювання, необхідно

виконати попереднє прогнозування траєкторії, яка припускається для вимірів або декількох ключових параметрів. Інструмент прогнозування траєкторії надає дані, необхідні для подальшого налаштування ПЗ WinTrack.

Крім того даний інструмент надає показники якості сигналу, які можливо очікувати при проведенні вимірювань, приймаючи до уваги конфігурацію та положення антенної системи, ефективну площу розсіювання об'єкту та дальність. Параметри руху об'єкту візуалізуються у графічному вигляді.

На основі даних прогнозованої траєкторії визначаються можливі оптимальні варіанти розміщення антенної системи відносно пускової установки (вогневої позиції, точки старту) у відповідності з метою випробувань.

Підготовка MFTR–2100/40 до проведення вимірювань здійснюється в наступній послідовності, а саме: оператор здійснює діагностику, юстування та калібрування кожного разу при:

- здійсненні маршру;
- переміщенні на позицію (зміні позиції);
- при зміні умов (завдання) вимірювань.

Юстування та калібрування включають у себе:

- стабілізацію та вирівнювання основи п'єдесталу антени відносно горизонту;
- конфігурування фактичного положення MFTR–2100/40 і пускової установки;
- калібрування енкадера азимуту відносно координат відомих точок відліку.

Налаштування вимірювального обладнання:

- конфігурування типів з'єднань і швидкостей передачі;
- підготовка директорій для збереження даних;
- конфігурування системи стеження радару вручну або шляхом загрузки попередньо підготовленого набору параметрів;
- конфігурування системи дальності радару вручну або шляхом загрузки попередньо підготовленого набору параметрів;
- перегляд детальної і узагальненої інформації про стан компонентів MFTR–2100/40;
- розгортання моноімпульсного блоку MC–100 (далі – MC – 100) для калібрування MFTR–2100/40;
- розгортання метеорологічної станції Vantage PRO2;
- розгортання навігаційного обладнання Leica GS16;
- визначення необхідних координат для роботи ПЗ WinTrack (антенної системи MFDR–2100/40 на позиції, пускової установки (вогневої позиції, точки старту, MC–100) безпосередньо в день проведення вимірювань;
- введення у ПЗ WinTrack усіх необхідних попередніх даних;
- виконання повторного планування місії та про-

гнозування траєкторії об'єкту з урахуванням усіх необхідних даних (у разі необхідності).

Параметри для введення у систему стеження ПЗ WinTrack наведені у [6–10].

Коли вимірювання зупинені, ПЗ WinTrack автоматично виконує ряд функцій збереження даних, що отримані в процесі вимірювань.

Отримані дані зберігаються у сесії. Сесія являє собою набір окремих вимірів, які структуровані за допомогою системи керування сесіями. Оператор сам вирішує, які виміри включаються у сесію.

Система керування сесіями дозволяє:

- управління загальними даними у сесіях;
- обробку одного або декількох параметрів;
- додавання та виключення вимірів із сесії;
- експорт даних.

Для керування в процесі виконання вимірювань по телевізійним каналам оператор обирає тип камери для стеження за об'єктом (телевізійна, інфрачервона або обидві), та вмикає/вимикає режим відеозапису чи фотографування у ПЗ VideoTrack.

Оброблення отриманих матеріалів вимірювань проводиться у пункті постійної дислокації MFTR–2100/40, визначеними для цього фахівцями Інституту, на спеціалізованих робочих місцях.

Час, необхідний для постоброблення отриманих траєкторних даних і фото/відео матеріалів, залежить від наступних факторів:

- тривалість випробувань;
- завдання на обробку отриманої інформації;
- комбінація застосування радіолокаційного та телевізійних каналів;
- обсяг отриманої інформації;
- за часом;
- за кількістю вимірюваних треків траєкторій, трас (сесій);
- за розміром інформації (Мбайти/Гбайти);
- інформативність отриманої інформації та фото/відео матеріалів;
- кількість спеціалізованих робочих місць, організованих для оброблення інформації;
- кількість операторів, які задіяні до постоброблення.

Враховуючи тривалість постоброблення даних вимірювань, які отримані під час проведення контрольних випробувань, підконтрольної експлуатації та визначальних відомчих випробувань MFTR–2100/40 визначено, що:

- експрес аналіз отриманих даних по радіолокаційному каналу для вимірювань тривалістю до 2 хвилин потребує витрат часу до 30 хвилин для одного вимірювання (може корегуватись в залежності від якості отриманої інформації);
- експрес аналіз отриманих даних по радіолокаційному каналу для вимірювань тривалістю до 40 хвилин потребує витрат часу до 2 годин для одного вимі-

рювання (може корегуватись в залежності від якості та об'єму отриманої інформації);

- повна обробка отриманих даних для вимірювань тривалістю до 2 хвилин потребує витрат часу до 4 годин для одного вимірювання (може корегуватись в залежності від якості отриманої інформації);

- повна обробка отриманих даних для вимірювань тривалістю до 40 хвилин потребує витрат часу до 2 робочих днів для одного вимірювання (може корегуватись в залежності від якості та об'єму отриманої інформації).

Обробка робочих файлів.

Робочий файл містить інформацію про треки траєкторій. Кожен трек траєкторії являється фрагментом траєкторії руху об'єкту. Робочий файл містить дані, отримані у процесі вимірювань, і дані результату постоброблення оператором.

Засоби оброблення робочого файлу дозволяють обчислити більшу кількість характеристик траєкторії, таких як проекція на землю, опір повітря, прискорення, тангенціальні швидкості та інше. Крім того визначається ряд параметрів завдяки функціям апроксимації (згладжування), які розраховують набір поліномів для оптимального оброблення даних.

Перед обробленням робочого файлу оператор обирає:

- відображення набору графіків в графічній області ПЗ WinTrack (від 1 до 6 незалежних один від одного графіків);

- налаштування графічного представлення відображення кожного графіку;

- обирання треків траєкторій для графічного відображення.

Обирання режиму апроксимації.

При виконанні апроксимації береться залежність окремого набору параметрів від часу і знаходиться "оптимальний" набір поліномів, який потім буде використаний для інтерполяції. Якщо апроксимація виконується над полярними координатами, перші точки радіальної швидкості, як їх видно від радару, дуже сильно залежать від паралаксу, що викликаний зміщенням променя радару відносно пускової установки (вогневої позиції, точки старту) і тому їх важко апроксимувати за допомогою поліномів.

У разі розглядання траєкторії з точки розміщення пускової установки (вогневої позиції, точки старту), вплив паралаксу відсутній, і тому виміряні полярні координати більш згладжені. Це дає більш точну апроксимацію за допомогою поліномів меншого порядку.

Щоб виконати перетворення із координат радару у координати пускової установки (вогневої позиції, точки старту) у ПЗ WinTrack реалізований алгоритм перерахування траєкторії відносно радару і величини дальності до об'єкту для кожної точки.

Дані про дальність містяться у записаних даних треку траєкторії, у разі їх відсутності можливо отрима-

ти дальність на основі тієї інформації, що є в наявності. У ПЗ WinTrack реалізовані два способи знаходження дальності:

балістичний/геометричний – дає кращі результати, якщо дистанція між радаром та пусковою установкою (вогневою позицією) не перевищує 1000 м. Введені під час вимірювань значення можуть бути згодом скореговані;

апроксимація кутів – дає кращі результати, якщо дистанція між радаром та пусковою установкою (вогневою позицією, точкою старту) перевищує 1000 м, за рахунок урахування кривизни Землі. При використанні цього методу не рекомендується змінювати орієнтацію системи координат радару або пускової установки (вогневої позиції, точки старту) після вимірювань.

Особливості застосування радарної системи MFTR–2100/40 при порівнянні фаз ехо-сигналів в двох або більше періодах повторення (межперіодна обробка) може виникати ситуація, коли об'єкт рухається з такою радіальною швидкістю, яка призводить до зсуву фаз в 360° , тобто, фактично, до нульової різниці фаз. Такий об'єкт не буде розпізнано як рухомий. Оскільки функція синуса є періодичною, то така ж ситуація буде виникати при зрушеннях фаз між ехо-сигналами в сусідніх періодах, кратних 360° , тобто при різниці фаз $\pm n \times 360^\circ$, де n – ціле число. Радіальну швидкість об'єкту, при якій виникає описаний ефект, називають сліпою швидкістю.

"Сліпі зони" при проведенні вимірювань для радарної системи MFTR–2100/40 проявляються при ортогональному розміщенні об'єкта відносно радару.

При проведенні ТВ необхідно уникати знаходження об'єкту вимірювань на одній лінії з Сонцем відносно оптичної осі оптико-електронних засобів.

Крім означеного, під час вибору позиції MFTR–2100/40 завжди необхідно враховувати умови вимірювання та заходи безпеки. Під час вибору позиції потрібно звернути увагу на наступні питання:

- чи існує пряма або непряма небезпека для MFTR–2100/40 або її екіпажу від стрілецької зброї або інших чинників?

- чи існують перешкоди, що блокують пряму видимість лінії траєкторії?

- чи будуть кутові швидкості кулі високими?

Якщо умови цих питань не виконані, позиція MFTR–2100/40 повинна бути змінена.

Особливої уваги потребує урахування того факту, що радар (антенна система) випромінює у простір електромагнітні хвилі різної потужності, що у більшості випадків негативно впливає на організм людини (стрілка, парашутиста), у разі попадання у промінь.

Виходячи із зазначеного, слід розмістити стрілка так, щоб уникнути впливу на нього випромінювання передавальної антени (включно з боковими пелюстками), а саме щоб він знаходився збоку антени радарної системи, а зріз ствола стрілецької зброї був ззаду за її

робочою площиною або на її рівні.

При цьому слід враховувати залежність ширини променя передавальної антени по азимуту та куту місця при роботі MFTR–2100/40 у різних режимах:

- 100% (320 Вт): $2,5^{\circ} \times 1,2^{\circ}$;
- 50% (160 Вт): $2,4^{\circ} \times 2,2^{\circ}$;
- 25% (80 Вт): $4,5^{\circ} \times 2,4^{\circ}$;
- 13% (40 Вт): $4,6^{\circ} \times 4,0^{\circ}$.

Вимірювання (випробування) необхідно проводити на підготовлений ділянку полігону (військового стрільбища), яка дозволить розташувати антенну систему MFTR–2100/40 так, щоб спостерігати траєкторію руху об'єкту вимірювань у прямій видимості.

Контейнер для MFTR–2100/40, в якому розміщене обладнання радарної системи та обладнані робочі місця операторів, вироблений із пресованих сендвіч-панелей (поліестер-поліуретан-поліестер) з товщиною стін 60 мм. Це в свою чергу, під час проведення вимірювань (випробувань) ракетного і артилерійського озброєння, потребує розміщення автомобіля з контейнером у захищеному місті з метою захисту операторів та обладнання на випадок нештатної ситуації – підриву у точці пуску або безпосередній близькості біля MFTR–2100/40.

Крім того необхідно враховувати EMC MFTR–2100/40 з об'єктом вимірювань та іншими радіотехнічними засобами, які будуть задіяні під час випробувань з метою уникнення впливу їх випромінювання на обладнання радарної системи.

Для проведення вимірювань позиція ДРС ЗТВ обирається з урахуванням вимог техніки безпеки під час проведення випробувань, “сліпих зон” радарної системи, особливостей місцевості, умов проведення вимірювань, EMC з об'єктом вимірювань та іншими радіотехнічними засобами, наявності перешкод, що блокують пряме бачення лінії траєкторії руху об'єкту, кутових швидкостей вимірювань, тощо.

Під час проведення випробувань при застосуванні MFTR–2100/40 було визначено ефективні позиції розміщення радару відносно об'єкту вимірювань.

При проведенні вимірювань ділянки траєкторії руху об'єкту випробувань MFTR–2100/40 слід розміщувати так, щоб необхідна ділянка траєкторії руху була в прямій видимості радару і не перетинала його “сліпу зону” ($\pm 10^{\circ}$ від ортогонального положення радару) відносно необхідної точки початку вимірювань.

При проведенні вимірювань параметрів кінцевої траєкторії руху та місця приземлення АТ MFTR–2100/40 слід розміщувати так, щоб необхідна ділянка траєкторії руху і місце приземлення були у прямій видимості радару і не перетинала “сліпу зону”. Відстань між позицією MFTR–2100/40 та місцем приземлення АТ визначається у кожному конкретному випадку окремо з урахуванням зон безпеки, первинних даних для налаштування СПЗ та особливостей місцевості.

При проведенні вимірювань АТ на початку його

руху MFTR–2100/40 розміщують так, щоб точка зльоту (старту) була в прямій видимості радару і не перетинала “сліпу зону”. Відстань між позицією MFTR–2100/40 та точкою зльоту (старту) АТ визначається у кожному конкретному випадку окремо з урахуванням зон безпеки, первинних даних для налаштування СПЗ та особливостей місцевості.

При проведенні вимірювань параметрів траєкторії руху БпЛА (БпАК) у ближній зоні відносно MFTR–2100/40, кінцевої траєкторії його руху, приземлення, або влучання в мішень радар слід розміщувати так, щоб необхідна ділянка траєкторії польоту і місце приземлення (влучання в мішень) були у прямій видимості антени радарної системи та не перетинала “сліпу зону”. Відстань між позицією MFTR–2100/40 та місцем зльоту (пуску), приземлення (влучання в мішень) БпЛА (БпАК) визначається у кожному конкретному випадку окремо з урахуванням зон безпеки, первинних даних для налаштування СПЗ та особливостей місцевості.

За результатами аналізу проведення вимірювань засобів ракетного озброєння та засобів ураження встановлено, що ефективне розміщення (MFTR–2100/40) доцільно проводити відносно вогневої позиції (пускової установки) – позаду вогневої позиції (пускової установки) в межах $\pm 30^{\circ}$ від осі напрямку стрільби. Мінімум допустима відстань від позиції радарної системи до вогневої позиції (пускової установки) визначається з урахуванням зон безпеки для кожного зразка ЗРО окремо.

При проведенні вимірювань ракетних комплексів та засобів ураження для них, ефективне розміщення MFTR–2100/40 відносно пускової установки – позаду пускової установки в межах $\pm 15^{\circ}$ від осі напрямку стрільби за винятком небезпечної зони $\pm 5^{\circ}$ від осі напрямку стрільби. Мінімум допустима відстань від позиції ДРС ЗТВ до пускової установки визначається з урахуванням зон безпеки для кожного ракетного комплексу окремо.

При проведенні вимірювань артилерійського озброєння та засобів ураження для нього, ефективне розміщення MFTR–2100/40 відносно вогневої позиції – позаду артилерійського озброєння в межах $\pm 15^{\circ}$ від осі напрямку стрільби за винятком небезпечної зони $\pm 5^{\circ}$ від осі напрямку стрільби, мінімум допустима відстань від позиції MFTR–2100/40 до вогневої позиції визначається з урахуванням зон безпеки для кожного зразка артилерійського озброєння окремо в межах (100÷200) м, для мінометів калібром до 120-мм зазначена відстань складає 100 м.

З урахуванням зон небезпеки знаходження особового складу біля радару, обирається вогнева позиція у безпечній зоні для запобігання негативного впливу опромінювання MFTR–2100/40 (включно з боковими пелюстками) на здоров'я стрілка. Вогневу позицію слід розміщувати збоку від антени радарної системи на

відстані (3÷4) м так, щоб зріз ствола стрілецької зброї співпадав з січенням робочої площини радару, допустиме переміщення вогневої позиції за робочу площу радару (назад) на відстань до 2 м. Постріл при цьому здійснюється у напрямку осі діаграми спрямованості радару.

Основними вимогами до ДРС ЗТВ являються дальність вимірювання $D_{\text{вим}} - 300$ км; середньоквадратична похибка вимірів: кутових координат $\Delta\beta, \epsilon$ – не більше 3' (кутових хвилин), дальності до динамічної цілі $\Delta D_{\text{оц}}$ – не більше 10 м; автоматичний (напівавтоматичний) захват та супроводження – до 5 об'єктів [10].

В останні роки створено клас ДРС ЗТВ, що здатні визначати координати об'єктів з ефективною площиною розсіювання $\sigma = (0,001 \div 1)$ м² на різних дальностях і висотах їх польоту (руху) в різних кліматичних умовах. Серед перспективних можливо відмітити сучасні ДРС ЗТВ з втіленням методів адаптивного приймання на базі плоскої фазованої антенної решітки (АФАР), застосуванням широкосмугових зондуючих сигналів та цифрової обробки радіолокаційної інформації, автоматизації процедури виявлення сигналів та виміру їх параметрів, а також процесу збору, узагальнення, ототожнення, передачі та відображення інформації. Точність вимірювань багатьох сучасних ДРС ЗТВ значно більша стандартних вимог до РЛС ЗТВ.

Важливо зазначити, що доцільно надавати пріоритет ДРС ЗТВ з безперервним випромінюванням та інтегрованими оптико-електронними каналами вимірювань (телевізійним, інфрачервоним), що значно розширюють можливості використання радарних систем при проведенні випробувань ОБТ.

Реалізація пеленгаційних методів визначення траєкторії руху об'єктів потребує наявності двох або трьох ДРС ЗТВ з відповідним апаратно-програмним забезпеченням для можливості однопунктної роботи та роботи у комплексі (сумісній) або побудови вимірювальних трас.

На теперішній час завдання ТВ для потреб ЗС України при проведенні випробувань ОБТ та боеприпасів вирішується за допомогою ДРС ЗТВ MFTR–2100/40, що може працювати самостійно та в режимі “Master-Slave” (ведуча/ведена). Для можливості комплексної роботи та побудови трас доцільно розробляти (виробляти) або розглядати для закупівлі зразки ДРС ЗТВ, що мають можливість сумісної роботи з зазначеною радарною системою.

Висновок

Таким чином, проведене дослідження дає можливість сформулювати рекомендації щодо застосування радарної системи MFTR–2100/40 при проведенні випробувань зразків озброєння та військової техніки на полігонах Збройних Сил України.

Список літератури

1. Наказ Міністра оборони України “Загальні вимоги до полігонно-випробувального комплексу Збройних Сил України № 19671 від 04.11.2015 р.”.
2. Загальні вимоги до радіолокаційної станції зовнішньотраєкторних вимірювань з можливістю отримання траєкторної інформації на відстані до 300 км. – Затверджено начальником Воєнно-наукового управління Генерального штабу Збройних Сил України 05.10.2017 року.
3. Загальні вимоги до станції оптико-електронного виявлення. – Затверджено начальником Воєнно-наукового управління Генерального штабу Збройних Сил України 05.07.2016 року.
4. Загальні вимоги до мобільної оптико-електронної станції зовнішньотраєкторних вимірювань. – Затверджено начальником Воєнно-наукового управління Генерального штабу Збройних Сил України 01.10.2017 року.
5. Меррилла І.Б. Справочник по радиолокації / І.Б. Меррилла, В.А. Скольник, под. общ. ред. В.С. Верби. Кн. 1. – М.: Техносфера, 2014. – 672 с.
6. Програмное обеспечение WinTrack. Руководство пользователя. UG–26252.13 [Електронний ресурс]. – 2018. – 456 с. – Режим доступу: <http://www.eltek.ru/zagruzitj/ruk-va-poljzovatelja-i-instrukcii-po-ustanovke..html>.
7. Наказ начальника Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки “Інструкція з організації та порядку використання радарної системи MFTR–2100/40 при проведенні випробувань озброєння та військової техніки у Збройних Силах України № 172 від 30.04.2020 року”.
8. Moore J.R. Practical aspects of multisensor tracking in Multitarget-Multisensor Tracking / J.R. Moore W.D. Blair // Applications and Advances. – Boston: Artech. House, 2000. – 231 p.
9. Додонов А.Г. Радиотехнические средства внешнетраекторных измерений / А.Г. Додонов, В.Г. Путятин. – К.: НАН Украины, 2018. – 58 с.
10. Weibel Doppler Radars [Electronic resource]. – Allerod: Denmark, 2019. – 1 p. – Available at: <http://www.tech-bel.com/products-services/radar-systems/>.
11. Дослідження шляхів розвитку та удосконалення елементів системи траєкторних вимірювань полігонного вимірювально-обчислювального комплексу. Звіт про НДР, шифр “Теодоліт”, № ДР 0101 U001999, ДНВЦ ЗС України / Ю.М. Добришкін, В.А. Ляшенко, О.В. Рижков, В.В. Стригун, О.В. Юла та ін. – Ч.: ДНВЦ, 2017. – 46 с.
12. Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження шляхів побудови мобільного оптико-електронного комплексу траєкторних вимірювань для проведення випробувань зразків ОБТ” (шифр “ВІЗИР”), 0119ZS002761 / В.М. Зозуля, В.А. Ляшенко, О.В. Рижков, В.В. Стригун, О.В. Юла та ін. – Ч.: ДНДІ ВС ОБТ, 2019. – 80 с.

Відомості про авторів:

Ляшенко Володимир Алімович

кандидат технічних наук старший дослідник
старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки,
Чернігів, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-0103-9815>

Зозуля Валерій Миколайович

начальник відділу державного науково-дослідного
інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6389-4302>

Рижков Олександр Володимирович

начальник лабораторії державного науково-дослідного
інституту випробувань і сертифікації озброєння
та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4820-0410>

Юла Олександр Васильович

начальник лабораторії державного науково-дослідного
інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6309-6594>

Стригун Віталій Васильович

старший науковий співробітник державного науково-
дослідного інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3483-1315>

Барвінок Руслан Дмитрович

старший науковий співробітник державного науково-
дослідного інституту випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0744-5737>

Information about the authors:

Vladimir Lyashenko

Candidate of Technical Sciences
Senior Research
of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0003-0103-9815>

Valerij Zozulia

Chief of Section of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6389-4302>

Oleksandr Rizhkov

Chief of Laboratory of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4820-0410>

Oleksandr Yula

Chief of Laboratory of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6309-6594>

Vitaly Strigun

Senior Research of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3483-1315>

Ruslan Barvinok

Senior Researcher of State Scientific Research Institute
of Armament and Military Equipment
Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0744-5737>

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАДАРНОЙ СИСТЕМЫ
MFTR - 2100/40 НА ОСНОВЕ ПРОВЕДЕННОГО АНАЛИЗА ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ
ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ НА ПОЛИгонах ВООРУЖЕННЫХ СИЛ УКРАИНЫ**

В.А. Ляшенко, В.Н. Зозуля, А.В. Рыжков, А.В. Юла, В.В. Стригун, Р.Д. Барвинок

Анализ существующих радарных систем траекторных измерений показывает их важную роль во время проведения испытаний новых и модернизируемых образцов вооружения и военной техники, которые предлагаются для принятия на вооружение Вооруженных Сил Украины. Результаты траекторных измерений являются исходными данными для оценки качества функционирования объектов испытаний. Существующая сеть полигонов, которая на данное время находится на территории Украины не позволяет проводить различные испытания и используется за узким, целевым назначением. Полигоны Вооруженных Сил Украины в полном объеме не оборудованы средствами траекторных измерений и потому они имеют ограниченные возможности относительно обеспечения проведения испытаний образцов вооружений и военной техники. В связи с этим, в 2018 году на снабжение Государственного научно-исследовательского института испытаний и сертификации вооружения и военной техники было поставлено доплеровскую радарную систему внешне - траекторных измерений типа MFTR-2100/40, в которой технически реализована одновременная совместная работа радиолокационного и оптико - электронных каналов, которые кроме траекторных параметров позволяют получить видеозапись (кинограмму, фотографический портрет) объекта сопровождения и дает возможность проведения анализа его пространственной ориентации в движении, траектории, динамику движения, разделения, подрыва, разрушения, пуска и т.д.

Исследования использования MFTR-100/40 во время проведения испытаний образцов вооружений и военной техники дали возможность сформировать следующие выводы: - целесообразность совместного применения оптико-электронных

каналов измерений (телевизионного, инфракрасного) вместе с радиолокационным; - зависимость работы радарной системы от метеорологических условий и необходимость проведения измерений в обычных метеорологических условиях, которые обеспечивают визуальный контакт и прямое радиолокационное сопровождение объекта в течение всей траектории его движения; - необходимость наличия в комплекте доплеровской радарной системы внешне траекторных измерений аппаратуры топогеодезичной привязки для определения пространственного положения антенного поста, ориентиров, мишеней юстировки и пусковой установки (точки стрельбы); - необходимость комплексного использования двух доплеровских радарных систем внешне траекторных измерений с целью построения измерительной трассы для определения полной траектории движения объекта); - необходимость выполнения доплеровской радарной системы внешне траекторных измерений в мобильном варианте для возможности перебазирования по всем видам дорог и бездорожья к определенному месту проведения измерений.

Ключевые слова: радарная система, траекторные параметры, объекты испытаний, внешне траекторные измерения.

EXPERIENCE OF THE USE OF MFTR-2100/40 RADAR SYSTEM DURING TESTING OF ARMAMENT AND MILITARY EQUIPMENT SAMPLES ON TESTING GROUNDS OF ARMED FORCES OF UKRAINE

V. Lyashenko, V. Zozulia, O. Rizhkov, O. Yula, V. Strigun, R. Barvinok

The analysis of the existent radar systems of the trajectory measurement proves their important role in testing new and modernized samples of armament and military equipment (AME), to be accepted by the Armed Forces of Ukraine. Results of the trajectory measurements are initial data for evaluation of quality for objects of tests functioning. The testing grounds network, which currently exists on the territory of Ukraine, does not provide diversity in use and exploited for the narrow specialized purpose. Testing grounds of Ukrainian Armed Forces are not equipped with measurement means. That is why they have limited capabilities in relation to providing full – scale tests of armament and military equipment. They are also restricted in relation to exercising uninterrupted control over the troops (forces) activities and application of armaments and destruction means. Undoubtedly, there is an urgent need in creation of modern testing ground complex that would be able to fully implement the programs of tests of armament and military equipment samples under conditions which meet contemporary vision of conducting combat operations. In this regard, in 2018 for the supply of the State Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification the Doppler Radar System for external trajectory measurements type MFTR - 2100/40 was delivered. In that radar system simultaneous concurrent operation of radar and optoelectronic channels is technically implemented, this in addition to trajectory parameters made possible to obtain video (film, photo portrait) of the object of tracking, which in its turn allows analyzing object's spatial orientation in motion, trajectory, motion dynamics, separation, explosion, destruction, launch etc. The research of the use of MFTR-2100/40 conducted during testing samples of armament and military equipment enabled to draw the followings conclusions: - feasibility of simultaneous use of the optical-electronic channels of measurement (television, infra-red) with radar channels; - dependence of radar system operation on meteorological conditions and the need for measurements in visual meteorological conditions (not adverse) that provide visual contact and direct radar vision of the object throughout the trajectory; - the need to have topogeodetic survey equipment in the radar system's set for determination the spatial position of the antenna post, landmarks, aligning targets and launcher (firing point); - the need for integrated use of two radar systems in order to form a measuring tracking route for determination full trajectory of the object (depending on the radar cross-section and the range of the moving object); - the need to have a mobile version of external trajectory measurement radar system for being capable of relocation on all road types (off-road) to a specific location of measurements.

Keywords: radar system, trajectory parameters, objects of tests, external trajectory measurements.